

宇宙重力波望遠鏡LISAのためのフォトレシーバの開発： 高・低周波数帯を分離したトランスインピー ダンスアンプ

著者	岡坂 洋輝
出版者	法政大学大学院理工学・工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	62
ページ	1-6
発行年	2021-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00023994

宇宙重力波望遠鏡 LISA のためのフォトレシーバの開発 高・低周波数帯を分離した トランスインピーダンスアンプ

DEVELOPMENT OF PHOTO RECEIVER FOR SPACE GRAVITATIONAL WAVE TELESCOPE “LISA”
TRANSIMPEDANCE AMPLIFIER WITH HIGH AND LOW FREQUENCY BANDS SEPSRETED

岡坂洋輝

Hiroki Okasaka

指導教員 佐藤修一

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻

The laser interferometer space antenna (LISA) is a future space-based interferometric gravitational-wave detector led by the European Space Agency (ESA). LISA is planned to be launched in 2034. Currently, the relevant instruments for LISA is being developed around the world, A team of Japan is considering the contribution of developing the photoreceivers. Since the LISA photo receiver receives several hundreds of pW of laser light, the noise level as small as $2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 30 MHz is required. In order to achieve the noise requirements, we installed transistor-based circuit, “regulated common-base”, in the first stage of the transimpedance amplifiers. In this a thesis, we report the design, noise simulation and experimental situation of the photoreceiver transimpedance amplifiers.

Key Words : Gravitational Wave, LISA , Optic , Photo receiver

1 研究背景

重力波とは、1916 年に Einstein が予言した光速で伝搬する時空のさざ波である。2015 年 9 月 14 日にアメリカの重力波検出器 LIGO によって、はじめて直接観測された。

現在、重力波検出器は地上でのレーザー干渉計が主流である。しかし、地面振動由来の雑音により、典型的には 10Hz より低い周波数帯で高感度化を達成するのは困難である。そこで、地球固有の雑音の影響を受けない宇宙重力波検出器の開発が進められている。中でも ESA が主導で行っている宇宙重力波望遠鏡 LISA は、3 つの宇宙機からなる超基線長のレーザー干渉計で、地上の検出器では検出困難な低周波数帯の重力波を検出できる。LISA の開発によって重力波天文学への貢献が大きく期待されている。

2 宇宙重力波望遠鏡 LISA

宇宙重力波望遠鏡 LISA は主に 1mHz-100mHz という低周波の周波数帯を狙っており、超大質量ブラックホール連星などからの重力波の検出を期待されている。LISA は 2034 年に打ち上げが予定されており、2015 年に打ち上げられた技術実証衛星 LISA Pathfinder によってさまざまな技術実証に成功した。しかし、全ての技術実証が行われたわけではなく、未だ複数の技術開発を必要としている。その

必要な技術の一つに長距離光ヘテロダイン検波技術がある。その中で特に重要なのが、フォトレシーバーの機器開発がある。

LISA の構成として 3 つの宇宙機を 250 万km間隔に打ち上げ正三角形に太陽周回軌道を飛行させる。

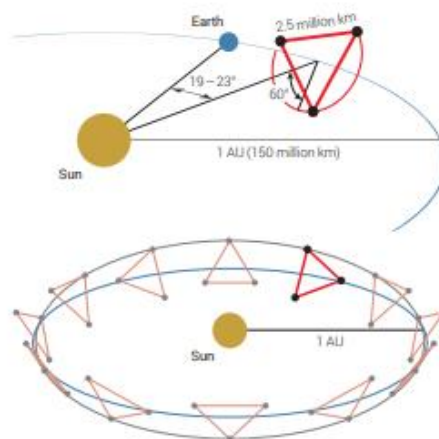


図1 LISA の衛星軌道 (引用元: 参考文献[1])

その間の距離変動を光ヘテロダイン検波という方式で重力波測定する(図 2)。

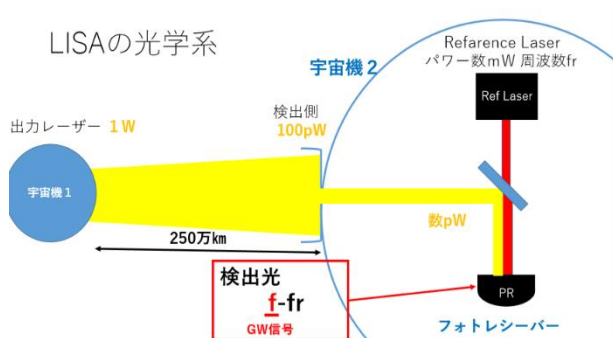


図2 光ヘテロダイン検波による距離変動測定

3 フォトレシーバー

干渉計型重力波検出器では、重力波が入射することによって引き起る光路長変動を、光の干渉によって強度変動として取り出す。したがって、フォトレシーバーは必要不可欠な装置である。本研究では、LISAからの要求値を達成する、フォトレシーバー増幅回路の開発を目指している。単純なオペアンプのみを用いた実装では、要求を満たすのは難しい。そのため我々は変換増幅回路の初段にトランジスタを用いたレギュレーテッドベース接地回路を搭載することで雑音要求の達成を目指す回路の設計を行い、実際に基板作成し、その性能実証を行った。

(1) 性能要求

光ヘテロダイン検波を実装するにあたり課題が2つ存在する。1つ目は、長期線長に伴う光の回折損失による光量の極小化への対応すること。一方の宇宙機から出力されたレーザー光(1 W)が、受け手側の宇宙機で検出されるときには光量が数 100 pW 程度である。したがって、入力換算雑音 $2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の低雑音で光検出をする必要がある。もう1つは宇宙機の相対運動によって、レーザー光がドップラーシフトし、ビート周波数が MHz オーダーで変化することである。これらの要求を含め、LISA のフォトレシーバーの要求仕様を表1に示す。

表1 フォトレシーバーの要求仕様

要求要素	要求値
入力換算雑音	2 pA/Hz ^{1/2} 以下
周波数応答	5-25 MHz
消費電力	50 mW 以下
受光エリア	直径 1-2 mm
ダイオード	InGaAs 素子・四分割アレイ

これらの要件を満たすような市販のフォトレシーバーは無い。そのため、日本のグループで開発を行う。

(2) フォトレシーバーの構成

フォトレシーバーは、光の強度を読み取る装置である。その構成は、図3のようにレーザー光を電流に変換するフォトダイオードと、その電流を電圧に変換して増幅させるトランスインピーダンスアンプ回路となっている。

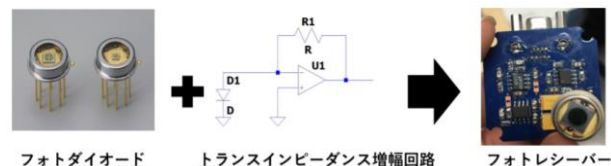


図3 フォトレシーバーの構成

フォトダイオードの作成については、共同開発で浜松ホトニクス株式会社に製作を依頼した。

4 トランスインピーダンスアンプ回路

本研究ではトランスインピーダンスアンプ回路の開発を行った。本年度は昨年度に引き続き周波数応答、雑音要求と消費電力要求を満たすような回路の作成を目指す。

(1) 従来型トランスインピーダンスアンプ回路

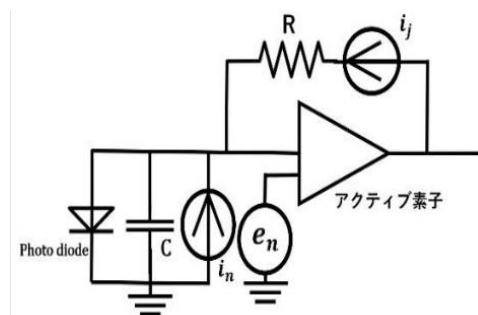


図4 初段にオペアンプを使用したトランスインピーダンスアンプ回路

もっとも単純な構成は、フォトダイオードに抵抗を接続したものの、市販品は図4のようなアクティブ素子にオペアンプを使用した構成のものが多い。また、Cはフォトダイオードの接合容量とオペアンプの入力容量の合計、 i_n, e_n はアクティブ素子の電流雑音と電圧雑音である。

a) 周波数応答

図4トランスインピーダンスアンプ回路の周波数応答について述べていく。図の回路には変換抵抗Rと入力容量Cで構成されるローパスフィルタによって

$$f_{TIA} = \sqrt{\frac{f_{GBW}}{2\pi RC}} \quad (1)$$

というカットオフ周波数が存在する。 f_{GBW} はアクティブ素子の利得帯域幅積 GBW。帯域を高周波まで確保するためには、高い GBW を持ったオペアンプを選定する必要がある。

b) 雑音

トランスインピーダンスアンプ回路に発生する雑音の総和は(電圧雑音は電流換算されている)

$$i_{total} = \sqrt{i_n^2 + (2\pi f e_n C)^2 + i_j^2} \quad (2)$$

i_j は変換抵抗 R の熱雑音で、 i_n はオペアンプの入力換算電流雑音、 e_n はオペアンプの入力換算電圧雑音で、ここでは電流雑音に換算している。LISA からの要求を達成するには、電圧雑音、電流雑音共に低いオペアンプを選定する必要がある。

以上より、初段にオペアンプを使用したトランスインピーダンスアンプ回路では要求達成は難しい。

(2) トランジスタを使用した

トランスインピーダンスアンプ回路

バイポーラトランジスタ(以後 BJT と呼ぶ)には性能を、自ら調整できるという特徴がある。

(a) バイポーラトランジスタの雑音性能

BJT を用いることで、雑音要求を満たすような増幅回路を設計できることを示す。BJT の雑音モデルは図 5 である。

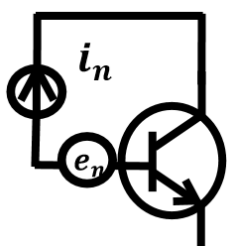


図 5 バイポーラトランジスタの雑音モデル

BJT の電流雑音はベース電流による電子の揺らぎのショットノイズである。電圧雑音はトランジスタ内部のエミッタ抵抗とベース部の接触によるベース広がり抵抗 $r_{bb'}$ によって生じる。2つの雑音はそれぞれ

$$i_n = \sqrt{\frac{2qI_c}{\beta}} \quad (3)$$

$$e_n = \sqrt{4k_B T \left(\frac{V_T}{2I_c} + r_{bb'} \right)} \quad (4)$$

となる。 I_c はコレクタ電流、 q は素電荷、 β は電流増幅率、 V_T はダイオードの熱電圧で $V_T = k_B T / q$ である。

使用するトランジスタは、低雑音なものが要求される。今回は Infinion 社の BFP842ESD(SiGe ヘテロ接合バイポーラトランジスタ)を使用した。

[3]から引用

(b) シミュレーション結果

BJTを用いて光電流を読み出した場合に達成される30 MHz での入力換算電流雑音を図6に示す。横軸はコレクタ電流とした。青がトランジスタの電圧雑音由来の電流雑音、緑がトランジスタの電流雑音、赤がその合計である。

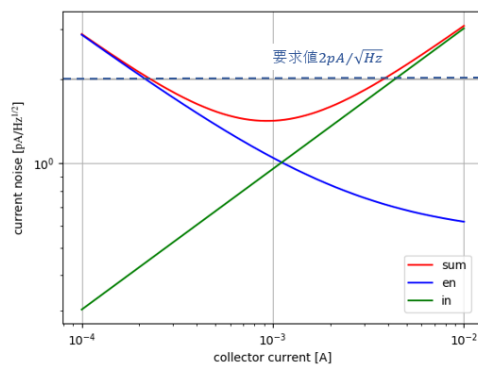


図 6 コレクタ電流による入力換算電流雑音の変化 ($r_{bb} = 5.2\Omega$, $\beta = 400$, $f = 30\text{MHz}$ で計算を行った)

コレクタ電流が約 1.1 mA 付近の時最小の雑音を取り、要求値である2 pA/√Hzを下回る。高周波駆動かつ $r_{bb'}$ が低く、高い電流増幅率 β を持つバイポーラトランジスタを選択することによって、更なる雑音の低減につながる。

5 レギュレーテッドベース接地回路

アクティブ素子にトランジスタを選択することで雑音要求の達成の可能性について前章で表した。

(1) 周波数応答

周波数応答を制限する主要因はフォトダイオードの接合容量である。接合容量と変換抵抗がローパスフィルタを形成し、帯域幅を制限する。変換抵抗を小さくすれば帯域幅は広がるが、Johnson 雑音が増加してしまう。そのため、ダイオードの接合容量と抵抗を切り離れたデザインが必要とされる。その達成のためにレギュレーテッドベース 接地回路(以後 RCB とする)を初段に組み込んだ。

図 7 が RCB の回路図である。

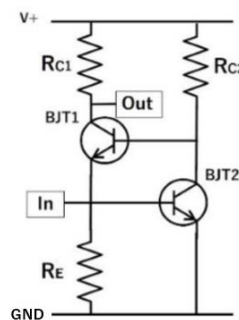


図 7 レギュレーテッドベース接地回路

レギュレーテッドベース接地の電流増幅率は1である。また、入力インピーダンスは

$$Z_{in} = \frac{r_{e1}}{1 + A_{v2}} \quad (5)$$

である。 $A_{v2} = R_{C2}/r_{e2}$ は BJT2 の電圧利得であり、その大きさの分だけ入力インピーダンスは小さくなる。したがって、フォトダイオードの接合容量と形成するローパスフィルタのカットオフ周波数が、より高周波まで移動する。そのため、周波数応

答において、フォトダイオードの接合容量の影響を無視することが出来る。また、この回路の伝達関数とカットオフ周波数は

$$\frac{V_{out}}{i_{in}} = \frac{R_{C1}}{1 + j\omega(C_{CE} + C_{CB})R_{C1}} \quad (6)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{C1}(C_{CE} + C_{CB})} \quad (7)$$

となる。 C_{CE} はBJT1のコレクタ-エミッタ間容量、 C_{CB} はBJT1のコレクタ-ベース間容量。伝達関数から、レギュレーテッドベース接地回路は抵抗 R_{C1} とBJT1の内部容量 $C_{CE} + C_{CB}$ による単純なローパスフィルタを形成する。

(2) 雑音

RCBではBJT2のみが支配的な雑音源になる。詳細に述べるとRCBの雑音は、それぞれのトランジスタに電流雑音、電圧雑音が存在するため、図8のようになる。

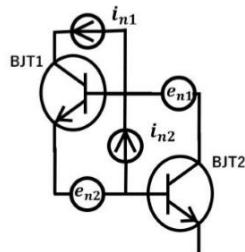


図8 レギュレーテッドベース接地回路の雑音モデル

しかし、BJT1の電圧雑音に関しては、フィードバックループ内なので、電圧雑音は

$$e_{n1}' = \frac{e_{n1}}{1 + \beta_2 r_e R_{C2}} \quad (8)$$

の利得分だけ減少する。このため、十分な β を確保できればBJT1の雑音は電流雑音のみを考慮に入ればよい。さらに、電流雑音を低減するために、流すコレクタ電流を小さくすれば、BJT1に関しては雑音をほぼ無視でき、トランジスタ単独と同様の雑音スペックを持つようになる。以上の理由により、レギュレーテッドベース接地回路はLISAの要求値をクリアすることが期待される。

6 トランスインピーダンスアンプ回路設計

(1) 設計回路

実際に設計した回路の概念図が図9である。

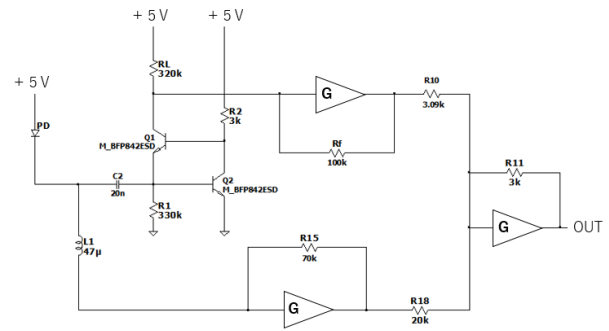


図9 設計したトランスインピーダンスアンプ回路の概念図

回路は高周波帯の信号を処理する上段と低周波帯の信号を処理する下段で構成されている。

(a) 高周波帯の信号処理用回路（上段）

回路は二段構成になっており、一段目はフォトダイオードからの電流信号を低いインピーダンスで受け取り、後段へそのまま出力するRCB回路である。二段目はエミッタ接地増幅回路と非反転増幅回路を組み合わせ、エミッタ接地回路の入力へフィードバックするフィードバック回路である。RCBから流れてきた電流はフィードバック抵抗 R_5 で電圧変換される。また、この回路における周波数応答の上限は、二段目の非反転増幅回路に使うオペアンプの性能で決まる。今回の設計では、浜松ホトニクスと共同開発した接合容量10 pFのフォトダイオード(まだ開発段階であり目標値の最大値である)を想定している。

(b) 低周波帯の信号処理用回路（下段）

フォトダイオードからの光電流DC成分が抵抗 R_1 に流れ電圧を発生させ、トランジスタにかけているバイアス電圧に影響を与え、トランジスタの性能に変動を引き起こす。よって、低周波数帯の信号処理を別に用意する必要がある。

図9の下部に示すようなオペアンプを使ったトランスインピーダンスアンプ回路を追加した。また、インダクタ L_1 は高周波帯の雑音を通さないために実装されている。この回路によって、フォトダイオードの低周波光電流は高周波信号とは分離され、電圧変換される。

(2) シミュレーションによる性能確認

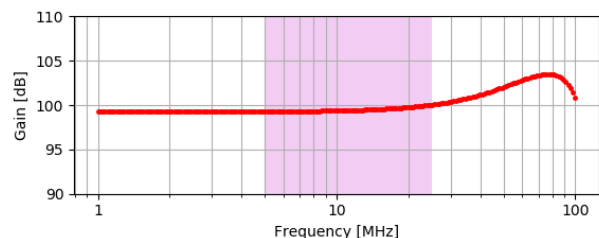


図10 トランスインピーダンスアンプ回路の

シミュレーション結果(ゲイン)

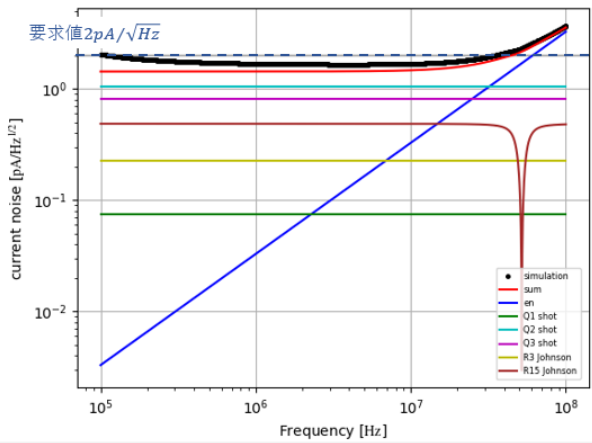


図 11 トランスインピーダンスアンプ回路の入力換算電流雑音シミュレーション

今回、性能に余裕を持たせるために 30 MHz での測定結果を載せる。図 10、図 11 から

- 5-30 MHz で +1 dB 以下の変動

- $1.92 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 30 MHz

となる。LISA の要求値を満たすことをシミュレーション上で確認した。

7 性能実証実験

設計した基板を用いて、要求性能を実際に満たすか実験にて検証する。実験で使用した電子部品は、要求を満たす範囲で、動作しやすいような値で作成している。実際に設計した回路が図 12 である。また、図 12 の回路を実装した基板が図 13 となる。

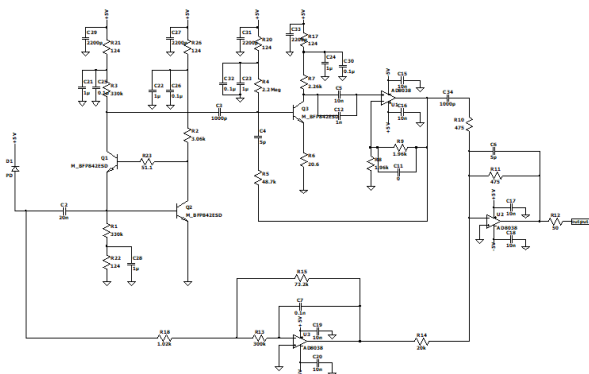


図 12 実験用回路の回路図

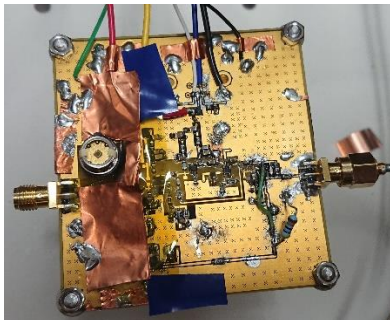


図 13 実装基板(4層基板, 縦 67 mm 横 63 mm)

性能実証にあたり周波数応答、入力換算雑音、消費電力の三つの性能を確認した。

(1) 周波数応答の性能確認

Liquid Instruments 社の MokuLab を用いて、直接レーザーをフォトダイオードに照射し周波数応答を測定した。その時の測定結果が図 14 である。

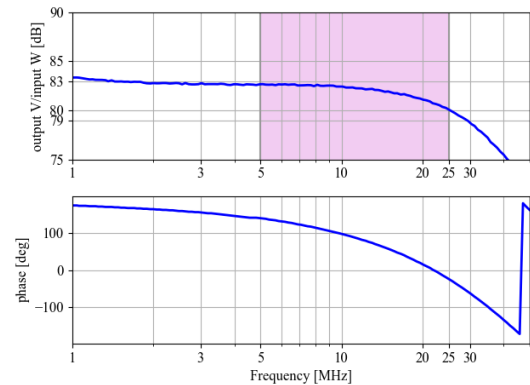


図 14 実装回路の周波数応答

図 14 より 5 MHz を基準に -3 dB 減衰するカットオフ周波数は 26 MHz であった。これは、LISA からの要求値を満たす性能である。

(2) 入力換算雑音の性能確認

次に Rohde&schwarz 社のスペクトラム・アナライザ「FSVA3004」を用いて入力換算電流雑音の測定をした。測定結果を図 15 に示す。青が測定値、緑が LTspice を用いた、フォトダイオードと基板の寄生容量の合計値である入力容量が 29 pF と想定した場合のシミュレーション値、赤が同じく LTspice を用いた、入力容量を 11 pF と想定した場合のシミュレーション値である。

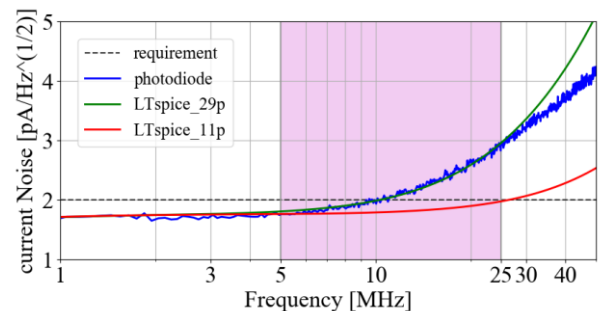


図 15 実装回路の入力換算雑音

図 15 より入力換算雑音は 25 MHz で $2.92 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、要求値を満たすことが出来なかった。

高周波で最も支配的な雑音は、トランジスタの電圧雑音由来の電流雑音であり、入力容量によって増加する。シミュレーションでは、この入力容量を 29 pF とした場合、実験結果を最も説明できることがわかった。したがって、入力容量が 29 pF 存在すると考えられ、数値計算によると、

入力容量が 11 pF まで低減すれば、要求値を満たすことが出来ると推測される。

(3) 消費電力

回路基板に供給する電源の電圧出力と電流出力によって、消費電力を算出する。この回路での消費電力は $45 \pm 1 \text{ mW}$ であった。これは、要求値を満たす性能である。

8 まとめと結論

宇宙重力波望遠鏡 LISA の要求を満たすようなフォトレシーバー増幅回路の設計をし、その性能実証を行った。周波数応答・消費電力に対して、要求値を満たすことが確認できた。一方で、入力換算雑音に対しては、要求値よりも 1.5 倍大きいことが測定から明らかとなった。これは基板由来の寄生容量とフォトダイオードの寄生容量の大きさが原因だと考えられ、二つの容量の合計値が 11 pF 以下に低減することで、要求を満たすことが出来ると推測される。

性能実証実験より周波数応答・消費電力の要求値をクリアし、入力換算雑音に関しても、要求クリアの道筋を示せた。LISA の目標感度達成への可能性を示した。

参考文献

- 1), P Amaro-Seoane, Laser Interferometer Space Antenna, 2017
- 2) PAUL HOROWITZ, The Art of electronics 3rd edition
- 3) Germán Fernández Barranco, et al, A Low-Power, Low-Noise 37-MHz Photoreceiver for Intersatellite Laser Interferometers Using Discrete Heterojunction Bipolar Transistors (2018)
- 4) 石橋 幸男 アナログ電子回路 (電子・情報工学講座) 培風館 1990
- 5) Infineon-BFP842ESD
(https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BFP842ESDDS-v02_00EN.pdf?fileId=5546d46265f064ff01663896cf294ebc)
- 6) 鈴木 雅臣 定本 トランジスタ回路の設計 CQ 出版 1991